

Vorrichtung zur Kompensation der akustischen Rückkopplung bei einem System zur aktiven Geräuschminderung

Bibliographic data	Description	Claims	Mosaics	Original document	INPADOC legal status
Publication number:	DE19505610 (A1)				
Publication date:	1996-08-22				
Inventor(s):	BENDEL KARL DR [DE]; AREVALO LUIS DR [DE]; HILLER CHRISTOPH [DE]				
Applicant(s):	BOSCH GMBH ROBERT [DE]				
Classification:					
- international:	G10K11/178; G10K11/00; (IPC1-7); G10K11/178				
- European:	G10K11/178C				
Application number:	DE19951005610 19950218				
Priority number(s):	DE19951005610 19950218				
Also published as:					
 WO9626516 (A1)					
View INPADOC patent family					
View list of citing documents					
Report a data error here					
Abstract of DE 19505610 (A1)					





19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 195 05 610 A 1

51 Int. Cl.⁸:
G 10 K 11/178

21 Aktenzeichen: 195 05 610.8
22 Anmeldetag: 18. 2. 95
43 Offenlegungstag: 22. 8. 96

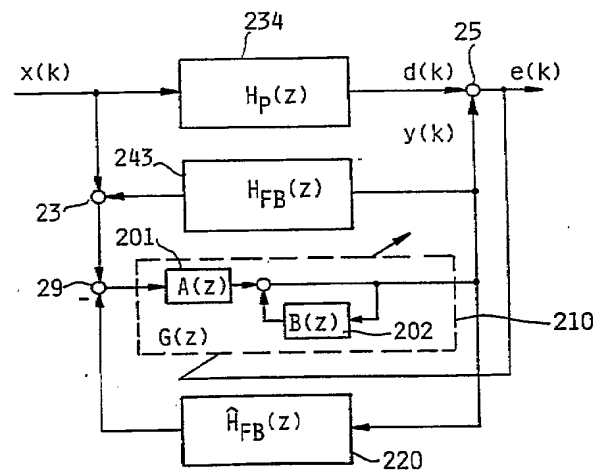
DE 195 05 610 A 1

71 Anmelder:
Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

72 Erfinder:
Bendel, Karl, Dr., 71701 Schwieberdingen, DE;
Arévalo, Luis, Dr., 70839 Gerlingen, DE; Hiller,
Christoph, 73728 Esslingen, DE

54 Vorrichtung zur Kompensation der akustischen Rückkopplung bei einem System zur aktiven Geräuschminderung

57 Das Strukturbild der erfindungsgemäßen Vorrichtung zur Kompensation der akustischen Rückkopplung bei einem System zur aktiven Geräuschminderung zeigt in regelungstechnischer Darstellung einen Block (234) mit der Übertragungsfunktion $H_P(z)$ des schallgestörten Raumes. Mit Block (243) ist die Übertragungsfunktion der akustischen Rückkopplung $H_{FB}(z)$ dargestellt, die zwischen Sekundärschallquelle und Referenzsensor im Raum herrscht und das Referenzsignal $x(k)$ am Punkt (23) verfälscht. Block (210) stellt die Übertragungsfunktion $G(z)$ des adaptiven Reglers dar, wobei mit $A(z)$ und $B(z)$ die Filterfunktionen der digitalen Filter (201) und (202) bezeichnet sind, die zusammen ein IIR Verhalten haben. Mit Block (220) ist die Funktion $\hat{H}_{FB}(z)$ des Streckenmodells (220) bzw. der Referenzstrecke bezeichnet, die dem Regler (210) antiparallel geschaltet ist. Damit wird durch Aufschalten des Streckenmodells (220) mit negativem Vorzeichen auf den Eingang des adaptiven Reglers (210) die akustische Rückkopplung elektrisch kompensiert. Die destruktive Überlagerung des Störschalls $d(k)$ und des Kompensationsschalls $y(k)$ am Punkt (25) des Fehlersensors ergibt das Fehlersignal $e(k)$ als Eingangssignal auf den Adaptionseingang des Reglers (210).



DE 195 05 610 A 1

Beschreibung

Stand der Technik

Die Erfindung geht aus von einer Vorrichtung zur Kompensation der akustischen Rückkopplung bei einem System zur aktiven Geräuschminderung gemäß der im Oberbegriff des Anspruchs 1 definierten Gattung.

Bei einer bekannten Vorrichtung dieser Art (US 4 473 906) ist in der mehrere Filter enthaltenen Steuerung ein adaptives Filter für die Kompensation der Rückkopplung vorgesehen. Dieses Filter hat FIR Struktur (Finite Impulse Response Struktur), d. h., daß das Filter begrenzt auf einen Impuls anspricht. Dieses bekannte System ist im Adaptionverhalten wenig robust. Weiterhin können mit einer solchen Anordnung wegen der FIR-Struktur des Steuerungsfilters keine Fehler der akustischen Rückkopplungskompensation ausgeglichen werden.

Generell wird bei Systemen zur aktiven Geräuschminderung bzw. Geräuschkompensation unerwünschter Schall bzw. Störgeräusche mit Hilfe zusätzlicher Schallquellen, wie z. B. Lautsprecher, durch destruktive Interferenz ausgelöscht beziehungsweise gemindert.

Wie in der genannten US 4 473 906 beschrieben, wird häufig eine Struktur mit zwei Sensoren verwendet. Dabei liefert der erste Sensor, im allgemeinen ein Mikrophon, ein Referenzsignal für die adaptive Regelung. Der zweite Sensor, im allgemeinen ebenfalls ein Mikrophon, liefert das Restgeräusch oder das Fehlergeräusch, welches das Ergebnis der Überlagerung von Störgeräusch und digital erzeugtem und von der Kompensationsschallquelle ausgestrahltem Sekundärschall ist. Das vom zweiten Sensor ermittelte Fehlersignal wird der Regelung zur Anpassung und Verfeinerung zugeführt.

Vorteile der Erfindung

Die erfindungsgemäße Vorrichtung zur Kompensation der akustischen Rückkopplung bei einem System zur aktiven Geräuschminderung mit den kennzeichnenden Merkmalen des Anspruchs 1 hat demgegenüber den Vorteil der erheblich erhöhten Stabilität des Systems zur aktiven Geräuschminderung und ermöglicht eine höhere Dämpfung des Störgeräuschs. Durch die effektive Kompensation der akustischen Rückkopplung hängt die Gesamtdämpfung nicht mehr von den Interferenzeffekten am Ort des Referenzmikrophons ab.

Der grundlegende Gedanke bei der vorliegenden Erfindung besteht darin, daß die akustische Rückkopplung elektrisch kompensiert wird, wobei ein Streckenmodell gegenparallel zum Regler geschaltet ist, derart, daß der Ausgang des Streckenmodells mit negativem Vorzeichen auf den Eingang des Reglers geschaltet ist. Dadurch wirkt der Ausgang des Reglers nicht mehr auf seinen Eingang ein. Somit wird der Regler wesentlich robuster und stabiler und ist darüber hinaus in der Lage, schneller auf Änderungen des Störgeräuschs kompensierend zu reagieren.

Durch die in den weiteren Ansprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen der im Anspruch 1 angegebenen Vorrichtung möglich.

Gemäß einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung wird das Streckenmodell im Rahmen einer Präambelphase vorab, d. h. vor Inbetriebnahme des Systems, gewonnen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sieht eine weitere zweckmäßige Ausgestaltung vor, daß das Streckenmodell durch im Betrieb mitlaufende Systemidentifikation gewonnen bzw. laufend optimiert wird. Die mitlaufende Streckenidentifikation kann entweder ganz separat von der Präambelphase allein das Streckenmodell ermitteln, oder zusätzlich zu den in der Präambelphase gewonnenen Parametern des Streckenmodells diese laufend aktualisieren und verbessern. Dadurch ist eine ständige Optimierung ermöglicht.

Gemäß einer weiteren zweckmäßigen Ausgestaltung der Erfindung enthält der Regler zwei adaptive FIR-Filter, wobei das eine Filter rekursiv geschaltet ist. Gemeinsam bilden diese Filter ein IIR-Filter (Infinite Impulse Response Filter), d. h. ein Filter mit unbegrenztem Ansprechen auf einen Impuls. Ein FIR-Filter (Finite Impulse Response Filter), ist ein Filter mit begrenztem Ansprechen auf einen Impuls.

In vorteilhafter Ausgestaltung wird das IIR-Filter mit Hilfe einer gefilterten Variante des RLMS-Algorithmus (Recursive Least Mean Square Algorithmus) adaptiert. In besonders zweckmäßiger Weise wird der Adaptationsprozeß durch Rückführung eines zusätzlichen FIR-Anteils unterstützt, wodurch die Anzahl der zu modellierenden Polstellen verringert wird.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung kann in vorteilhafter Ausgestaltung in einer Steuerungs- bzw. Feedforward Struktur aufgebaut sein oder in einer Regelungs- bzw. Feedback Struktur.

Gemäß weiterer vorteilhafter Ausgestaltung der Erfindung kann sie nicht nur einkanalig verwendet werden, sondern auch auf ein mehrkanaliges System zur Geräuschkompensation angewandt werden.

Bei der Feedback Struktur ist in zweckmäßiger und besonders vorteilhafter Weise ein Entzerrer vorgesehen, welcher die vollständige Betragsentzerrung der Fehlerstrecke bewirkt. Eine besonders günstige Weise der Realisierung des Entzerrers liegt darin, daß er als Transversalfilter realisiert ist, dessen Entwurf vorzugsweise auf dem Prinzip der linearen Prädiktion basiert.

Zeichnung

Die Erfindung ist anhand mehrerer in der Zeichnung dargestellter Ausführungsbeispiele in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 schematisch ein Blockschaltbild der akustischen Seite und der elektrischen Seite eines Systems zur aktiven Geräuschdämpfung mit der erfindungsgemäß gestalteten Kompensation der akustischen Rückkopplung, wobei das System in Steuerungs- bzw. Feedforward-Struktur aufgebaut ist;

Fig. 2 ein Strukturbild der Anordnung von Fig. 1 in regelungstechnischer Darstellung, wobei die Übertragungsfunktion aus Fig. 1 zwischen Lautsprecher und Fehlermikrophon gleich eins gesetzt ist;

Fig. 3 schematisch ein Blockschaltbild der akustischen Seite und der elektrischen Seite eines weiteren Systems zur aktiven Geräuschdämpfung mit der erfindungsgemäß gestalteten Kompensation der akustischen Rückkopplung, wobei das System in einer Regelungs- bzw. Feedback-Struktur aufgebaut ist und einen Entzerrer enthält;

Fig. 4 ein Strukturbild der Anordnung von Fig. 3 in regelungstechnischer Darstellung, jedoch ohne Entzerrer;

Fig. 5 ein Strukturbild in regelungstechnischer Darstellung einer weiteren Ausführungsform der Anordnung gemäß Fig. 3, wobei ein Entzerrer in das System eingefügt ist, und

Fig. 6 ein Blockschaltbild einer zweikanalig aufgebauten Vorrichtung als Beispiel für ein mehrkanaliges System.

Beschreibung der Ausführungsbeispiele

In Fig. 1 ist in einem Blockschaltbild die akustische Seite und die elektrische Seite eines ersten Systems zur aktiven Geräuschdämpfung mit der erfindungsgemäß gestalteten Kompensation der akustischen Rückkopplung dargestellt. Das System ist dabei in Steuerungs- bzw. Feedforward-Struktur aufgebaut. Auf der akustischen Seite erreicht beispielsweise in einem Rohr 1 durch drei Kreisbögen 2 dargestellter Störschall ein erstes Mikrophon 3, welches als Sensor ein Referenzsignal abgibt. Es sei der Einfachheit halber angenommen, daß der Schall 2 von links in das Rohr 1 eintritt und sich von dort nach rechts zu einem Lautsprecher 4 und einem weiteren Mikrophon 5 hin fortpflanzt.

Die akustische Seite besteht also im wesentlichen aus dem im Ausführungsbeispiel rohrförmig gestalteten Raum 1, den beiden Mikrophonen 3 und 5 sowie dem Lautsprecher 4. Der Lautsprecher 4 dient als sogenannte Sekundärquelle, die den Kompensationsschall in den Raum 1 abgibt, um dadurch den Störschall 2 zu kompensieren, jedenfalls zu dämpfen. Im Idealfall hat der Sekundärschall die gleiche Amplitude und genau die jeweilige Gegenphase zum Störschall, so daß dieser durch destruktive Interferenz bei der Überlagerung ausgelöscht wird. Das Ergebnis der Überlagerung von Störschall 2 und dem vom Lautsprecher 4 eingespeisten, digital erzeugten Sekundärschalls wird über einen Tiefpaß 14 und einen Verstärker 15 dem Lautsprecher 4 bzw. allgemein der Sekundärschallquelle, zugeführt.

Auf der elektrischen Seite des Systems wird das vom ersten Mikrophon bzw. Sensor 3 festgestellte Referenzsignal über einen Verstärker 6, einen Tiefpaß 7 und einen Analog-Digital-Wandler 8 sowie einen Summationspunkt 9 einem Regler 10 zugeführt. Der Ausgang 11 des Reglers 10 ist über eine Leitung 12 auf einen Digital-Analog-Wandler 13 geführt. Das so gewonnene Analogsignal des digital erzeugten Kompensations- bzw. Sekundärschalls wird über einen Tiefpaß 14 und einen Verstärker 15 dem Lautsprecher 4 bzw. allgemein der Sekundärschallquelle, zugeführt.

Das vom zweiten Mikrophon 5 festgestellte Fehlersignal wird auf der elektrischen Seite des Systems über einen Verstärker 16, einen Tiefpaß 17 und einen Analog-Digital-Wandler 18 einem weiteren Steuereingang 19 des Reglers 10 zugeführt. Dieser Steuereingang 19 kann auch als der adaptive Eingang des Reglers 10 bezeichnet werden. Über das zugeführte Fehlersignal wird die Adaption des Reglers 10 immer mehr dahin gehend verbessert, daß das digital erzeugte Signal für den zu kompensierenden Sekundärschall so geändert wird, daß die Leistung des vom Sensor 5 aufgenommenen Fehlersignals gegen Null geht.

Wie aus der Darstellung der akustischen Seite des Systems hervorgeht, gibt es eine akustische Rückkopplung vom Lautsprecher 4 zurück auf den ersten Sensor 3, der das Referenzsignal für den Regler 10 liefert. Durch diese Rückkopplung kann das Referenzsignal und damit die Stabilität des Systems negativ beeinflusst werden. Zur Kompensation dieser Rückkopplung, die auf der akustischen Seite mit dem gestrichelten Pfeil 43 bezeichnet ist, ist erfindungsgemäß auf der elektrischen Seite ein Streckenmodell 20 vorgesehen. Dieses Streckenmodell ist zwischen den Ausgang 11 des Reglers 10 und den Summationspunkt 9, der den Eingang des Reglers 10 darstellt, geschaltet. Das Signal, welches das Streckenmodell 20 liefert, wird mit negativem Vorzeichen auf den Summationspunkt 9 gegeben. Es läßt sich auch sagen, daß das Streckenmodell 20 antiparallel zum Regler 10 geschaltet ist. Das Streckenmodell 20, welches auch als Modell der Referenzstrecke zu bezeichnen ist, beschreibt die Strecke zwischen Lautsprecher 4 und Referenzsensor 3. Wird dies mit negativem Vorzeichen auf den Summationspunkt 9 gegeben, dann erhält der Regler 10 an seinem Signaleingang ein reines Referenzsignal, d. h. ein Signal, welches nur den Störschall 2 wiedergibt, nicht aber die Überlagerung von Störschall und Schall, welcher vom Lautsprecher 4 kommt, am Ort des ersten Sensors 3.

Der Regler 10, wie er in Fig. 1 dargestellt ist, besteht aus zwei adaptiven Filtern 101 und 102. Der Eingang des Filters 101 stellt gleichzeitig den Eingang des Reglers 10 dar, der das Referenzsignal vom Summationspunkt 9 erhält. Der Ausgang des Filters 101 ist sowohl Eingang des zweiten Filters 102 als auch Ausgang 11 des Reglers 10. Der Ausgang des zweiten Filters 102 wird dem Ausgangssignal des ersten Filters 101 an dessen unmittelbaren Ausgang überlagert. Das Filter 102 ist somit direkt rückgekoppelt.

Das Filter 10 ist ein adaptives IIR-Filter, welches mit Hilfe einer gefilterten Variante des RLMS-Algorithmus adaptiert wird. IIR steht für Infinite Impulse Response und bedeutet, daß ein solches Filter unbegrenzt auf einen Impuls anspricht. RLMS steht für Recursive Least Mean Square und bedeutet, daß ein quadratisches Fehlermaß nach dem stochastischen Gradientenverfahren mit einem rekursiven System minimiert wird.

Der Adaptationsprozeß wird durch die Rückführung eines zusätzlichen FIR Anteils unterstützt, um die Anzahl der zu modellierenden Polstellen zu verringern. Dies wird durch das Filter 20 vorgenommen. Dabei steht FIR für Finite Impulse Response und bedeutet, daß ein solches Filter begrenzt auf einen Impuls anspricht.

Dadurch, daß der Ausgang 11 des Reglers 10 über das Streckenmodell 20 auf seinen Eingang zurückgekoppelt ist, ist der Regler 10 wesentlich stabiler, so daß mit höheren Konvergenzgeschwindigkeiten gearbeitet werden kann, die eine schnelle Reaktion auf Änderungen in der spektralen Zusammensetzung des Störgeräusches

zulassen.

In Fig. 2 ist ein Strukturbild der Anordnung von Fig. 1 in regelungstechnischer Darstellung gezeigt, wobei aus Vereinfachungsgründen die Strecke 45 zwischen Lautsprecher 4 und Mikrophon 5 als Übertragungsfunktion gleich eins gesetzt ist. Mit Block 234 ist die Übertragungsfunktion $H_p(z)$ des schallgestörten Raumes 1 zwischen Referenzsensor 3 und Sekundärschallquelle 4 dargestellt. Dies entspricht in Fig. 1 dem gebogenen Pfeil 34. Mit Block 243 ist die Übertragungsfunktion der akustischen Rückkopplung $H_{FB}(z)$ dargestellt, die zwischen Sekundärschallquelle 4 und Referenzsensor 3 im Raum 1 herrscht und in Fig. 1 mit dem gestrichelten Pfeil 43 bezeichnet ist. Block 210 stellt die Übertragungsfunktion $G(z)$ des Reglers 10 aus Fig. 1 dar, wobei mit $A(z)$ und $B(z)$ die Filterfunktionen der digitalen Filter 101 bzw. 102 aus Fig. 1 dargestellt sind. Mit Block 220 ist die Funktion $H_{FB}(z)$ des Streckenmodells bzw. der Fehlerstrecke bezeichnet, die dem Schaltungsblock 20 in Fig. 1 entspricht.

Wie in Fig. 2 dargestellt, wird eine Referenzgröße $x(k)$, die dem zugeführten Geräusch entspricht, dem Block 234 und einem Punkt 23, der dem Sensor 3 aus Fig. 1 entspricht, zugeführt. Dem Punkt 23 wird noch das Ausgangssignal des Blocks 243 zugeführt. Dies so entstandene Signal wird einem Summationspunkt 29 zusammen mit dem negativen Ausgangssignal des Blocks 220 zugeführt, und das so entstandene Signal ist der Eingangswert des Blocks 210, d. h. für die Regelfunktion $G(z)$. Am Punkt 25, der dem zweiten Sensor 5 in Fig. 1 entspricht, überlagern sich die Ausgangsgröße $d(k)$ der Übertragungsfunktion $H_p(z)$ des Blocks 234 mit dem Ausgangssignal $y(k)$, das auch als Kompensationssignal bezeichnet werden kann, des Reglers 210. Das am Punkt 25 festgestellte Fehlersignal $e(k)$, das dem Restgeräusch am Ort des zweiten Sensors 5 entspricht, wird dem Regler 210 zum Adaptieren zugeführt.

Die von k abhängigen Größen e , d , x und y gehören der akustischen Seite des Systems an. Dabei stellt k die diskrete Zeitvariable dar, also bezeichnen die Größen e , d , x und y den jeweiligen Abtastwert der zugehörigen analogen Funktion. Die von z abhängigen Größen H_p , H_{FB} , A , B , G und H_{FB} beschreiben das Verhalten der zugehörigen Systeme im Frequenzbereich, wobei z die komplexe Frequenzvariable für Abtastsysteme bezeichnet. Da das Gesamtsystem digital realisiert wird, ist dies die adäquate Beschreibung.

Gemäß der Erfindung wird die akustische Rückkopplung mit Hilfe des Streckenmodells 20 bzw. 220 elektrisch kompensiert. Das Streckenmodell stellt das Modell der Fehlerstrecke 43 bzw. 243 dar und wird mit negativem Vorzeichen auf den Regler 10 bzw. 210 gegeben. Dadurch steht dort eingangsseitig ein von der Sekundärschallquelle 4 weitgehend, im Idealfall vollständig, unbeeinflusstes Signal des zu dämpfenden bzw. zu kompensierenden Geräusches an.

Die Ermittlung des Streckenmodells kann vorab, d. h. vor Inbetriebnahme des Systems, in einer Präambelphase erfolgen. Dabei wird durch Beschicken der Fehlerstrecke mit einem bestimmten, bekannten Signal und Messen dessen, was am Ende der Fehlerstrecke von diesem Signal ankommt, auf die Beschaffenheit der Fehlerstrecke geschlossen. Dies gilt selbstverständlich in dem Sinne, daß das Signal die gesamte Übertragungsbandbreite abdeckt. Aufgebaut ist das Streckenmodell als Filter, das wie die Antwort der Strecke auf einen Impuls aussieht.

Das Streckenmodell kann auch durch eine im Betrieb des Systems zur aktiven Geräuschminderung mit laufende Systemidentifikation ermittelt werden. Vorteilhaft kann auch eine Kombination beider Verfahren sein, nämlich ein in einer Präambelphase ermitteltes Streckenmodell wird nach Inbetriebnahme des Geräuschminderungssystems durch die mitlaufende Systemidentifikation einerseits ständig weiter verfeinert und andererseits an sich ändernde Verhältnisse auf der Fehlerstrecke der akustischen Rückkopplung angepaßt.

Durch das mit negativem Vorzeichen auf den Regler 10, 210 geschaltete Streckenmodell 20, 220, wird erreicht, daß das Ausgangssignal $y(k)$ des Reglers 210, der sich aus den adaptiven Filtern $A(z)$ und $B(z)$ zusammensetzt, nicht mehr auf dessen Eingang einwirkt. Das somit resultierende System ist äquivalent zu einer Struktur, bei welcher der Regler (Controller) nicht mehr Bestandteil eines rückgekoppelten Kreises ist. Man kann diese Struktur als eine CFF-Struktur, d. h. eine Controller-Feedforward oder Steuerungs-Struktur bezeichnen. Da die Modellierung der Rückkopplung grundsätzlich mit Schätzfehlern behaftet ist, wird erfindungsgemäß ein IIR-Filter als Regler verwendet, welches bei der Adaption jedoch nur eine geringe Zahl von Polstellen nachbilden muß. In zweckmäßiger Weise wird dieses IIR-Filter aus zwei FIR-Filtern gebildet, von denen eines rekursiv geschaltet ist. Das IIR-Filter wird mit Hilfe einer gefilterten Variante des RLMS-Algorithmus adaptiert. Dabei steht RLMS für Recursive Least Mean Square und bedeutet eine rekursive mittlere quadratische Berechnungsweise. Der Adaptionsprozeß wird also durch die Rückführung eines zusätzlichen FIR-Anteils unterstützt, um die Anzahl der zu modellierenden Polstellen zu vermindern.

In Fig. 3 ist ein Blockschaltbild der akustischen Seite und der elektrischen Seite eines weiteren Systems zur aktiven Geräuschdämpfung mit der erfindungsgemäß gestalteten Kompensation der akustischen Rückkopplung dargestellt, wobei das System in einer Regelungs- bzw. Feedback-Struktur aufgebaut ist. Dieses zweite System unterscheidet sich vom ersten in Fig. 1 dargestellten insbesondere grundsätzlich darin, daß der erste Sensor mit seinem Mikrophon 3 und den dazugehörigen elektrischen Bauteilen 6, 7 und 8 entfallen ist. Bei dieser sogenannten Feedback-Struktur fallen Referenz- und Fehlersensor zusammen, d. h. das einzige verwendete Mikrophonsignal des Mikrophons 5 dient sowohl zur Ansteuerung des adaptiven Reglers 10 mit seinen adaptiven Filtern 101 und 102, als auch zur Kontrolle der Adaption des Reglers 10.

Zwischen dem Ort des Mikrophons 5 in Fig. 3 und dem Ort des die Sekundärschallquelle bildenden Lautsprechers 4 liegt ein akustischer Pfad 45 mit einem bestimmten Übertragungsverhalten. Vom Ausgang des Reglers 10 durchläuft auf der elektrischen Seite das vom Regler erzeugte Kompensationssignal den Digital-Analog-Wandler 13, den Tiefpaßfilter 14 und den Verstärker 15 auf seinem Weg zum akustischen Aktuator 4. Ebenfalls durchläuft auf der elektrischen Seite das Regelsignal auf seinem Weg vom Mikrophon 5 über den Verstärker 16, den Tiefpaßfilter 17 und den Analog-Digital-Wandler 18 zum Adaptionseingang des Regler 10 eine Fehlerstrecke mit einem bestimmten Übertragungsverhalten. Betrachtet man die gesamte Strecke vom Ausgang des

Reglers 10 zum Lautsprecher 4 auf der elektrischen Seite, von dort zum Mikrophon 5 auf der akustischen Seite und von da wieder auf der elektrischen Seite über Verstärker 16, Tiefpaßfilter 17 und Analog-Digital-Wandler 18 bis zum Eingang des Reglers 10, so entspricht dies der sogenannten Fehlerstrecke. Im hier dargestellten Ausführungsbeispiel ist die Referenzstrecke die Strecke vom Lautsprecher 4 zum Referenzmikrophon 5 und das Fehlermikrophon entspricht dem Referenzmikrophon. Daraus resultiert, daß die Fehlerstrecke gleich der Referenzstrecke ist. 5

In Fig. 4 ist ein Strukturbild der idealen Anordnung von Fig. 3 in regelungstechnischer Darstellung gezeigt, jedoch ohne Entzerrer 31. Dabei stellt der Block 210 den Regler mit seiner Übertragungsfunktion $G(z)$ und der Block 40 die vorstehend beschriebene Fehlerstrecke mit der Übertragungsfunktion $H_{err}(z)$ dar. Vor der akustischen Überlagerung mit dem zu kompensierenden Störschall $d(k)$ durchläuft das vom Regler 210 errechnete Kompensationssignal $y(k)$ eine mittels des Blocks 40 dargestellte Fehlerstrecke, die das Übertragungsverhalten $H_{err}(z)$ hat. Das am Überlagerungspunkt 54 abnehmbare Fehlersignal $e(k)$ wird sowohl dem Reglereingang als auch dem Adaptationseingang des Reglers 210 zugeführt. 10

Durch das frequenzselektive Verhalten der Fehlerstrecke können manche Signalanteile stark gedämpft werden. Diese starke Dämpfung kann eine recht langsame Konvergenz der Adaption des Reglers 210 mit seiner Funktion $G(z)$ zur Folge haben. 15

Gemäß einer besonderen Ausgestaltung der in Fig. 3 dargestellten Anordnung, ist zwischen dem Ausgang des Reglers 10 und dem Digital-Analog-Wandler 13 ein Entzerrer 31 vorgesehen. Mit Hilfe dieses Entzerrers 31 wird eine vollständige Betragsentzerrung der Fehlerstrecke ermöglicht. Gleichzeitig ist dieser Entzerrer 31 so gestaltet, daß die vollständige Betragsentzerrung ohne Hinzufügung großer zusätzlicher Verzögerungen erfolgt. Der Entzerrer 31 wird dabei als Transversalfilter realisiert, vorzugsweise als FIR-Filter. Dadurch ist es möglich, die Frequenzselektivität der Fehlerstrecke in vorteilhafter Weise weitgehend zu eliminieren. 20

In Fig. 5 ist ein Strukturbild in regelungstechnischer Darstellung dieser Ausführungsform der Anordnung gemäß Fig. 3, also mit Einfügung des Entzerrers 31 in das System, gezeigt. Auf der akustischen Seite A ist ein Block 540 gezeigt, der die Fehlerstrecke mit der Übertragungsfunktion $H_{err}(z)$ darstellt. Am Ausgang dieser Fehlerstrecke steht das Kompensationssignal $y(k)$ an, welches mit dem Störgeräusch $d(k)$ überlagert wird. Am Punkt 55 wird das Ergebnis dieser Überlagerung als Fehlersignal $e(k)$ ermittelt. Dieses Fehlersignal $e(k)$ wird auf der elektrischen Seite E, die von der akustischen Seite A durch die gestrichelte Linie D symbolisch getrennt dargestellt ist, dem Summationspunkt 59 und dem Adaptionseingang des Blocks 510, der den adaptiven Regler mit der Funktion $G(z)$ repräsentiert, zugeführt. Der Ausgang des Reglers 510 ist auf den Eingang eines Blocks 531 geführt, welcher den Entzerrer 31 aus Fig. 3 mit der Übertragungsfunktion Ausgang des Reglers 510 auf den Eingang eines Blocks 520 geführt, der das Streckenmodell der gesamten Fehlerstrecke mit der Übertragungsfunktion $H_{Ges}(z)$ repräsentiert. Die gesamte Fehlerstrecke auf der elektrischen Seite E und der akustischen Seite A ist durch den gebogenen, gestrichelten Pfeil 534 angedeutet. Sie ist auch mit der Übertragungsfunktion $H_{Ges}(z)$ zu bezeichnen. Das Streckenmodell 520 weist dieselbe Übertragungsfunktion auf. Ihm wird am Eingang der Ausgang des Reglers 510 zugeführt. Sein Ausgang wird mit negativem Vorzeichen gemäß dem Kernpunkt vorliegender Erfindung auf den Summationspunkt 59 gegeben. Dadurch wird ein Signal $d(k)$ erzeugt, welches als bereinigtes Störgeräusch zu bezeichnen ist, in welchem sich der "möglichst reine" Störschall wiederfindet und dem Regler 510 zur Erzeugung des adäquaten Kompensationssignals $y(k)$ zugeführt wird. Auf diese Weise wird mit dieser so gestalteten Feedback-Struktur durch die mittels der Rückführung ermöglichte möglichst genaue Ermittlung des Störgeräuschs $d(k)$, eine äquivalente Steuerungs- bzw. Controller-Feedforward Anordnung. 25 30 35 40

Wie bereits erwähnt wurde, ist gemäß einer bevorzugten Ausführung der Erfindung der in Fig. 3 dargestellte Entzerrer 31 als Transversalfilter in FIR-Struktur realisiert. Der Entwurf dieses Filters basiert auf dem Prinzip der linearen Prädiktion. Aus einer bestimmten Anzahl NE, z. B. 100, von Koeffizienten der identifizierten Strecken-Impulsantwort $h_{err}(k)$ wird die zugehörige Autokorrelierte $p(K)$ bestimmt. Die Bestimmungsgleichung dafür lautet wie folgt: 45

$$NE-1-\kappa$$

$$p(\kappa) = \sum_{k=0}^{NE-1-\kappa} h_{err}(k) \cdot h_{err}(k + \kappa)$$

$$\kappa=0$$

Mit Hilfe der Durbin-Levinson-Rekursion werden damit die Yule-Walker-Gleichungen für die Koeffizienten $a_1 \dots a_N$ eines linearen Prädiktors vorgegebener Ordnung (N) gelöst: 60

$$\begin{bmatrix} \rho(0) & \rho(1) & \dots & \rho(N-1) \\ \rho(1) & \rho(0) & \dots & \rho(N-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho(N-1) & \dots & \dots & \rho(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho(1) \\ \dots \\ \rho(N) \end{bmatrix}$$

Für die Koeffizienten der Entzerrerimpulsantwort resultiert schließlich die Folge $\{1, -a_1, -a_2, \dots, -a_N\}$.

Die erfindungsgemäß gestaltete Rückführung erhöht zum einen die Stabilität des aktiven Geräuschminderungssystems erheblich, macht es also wesentlich robuster, und ermöglicht zum anderen eine höhere Dämpfung des Störschalls. Das erfindungsgemäße System bietet den Vorteil, daß durch separate Mikrophone Referenz- und Fehlersignal an unterschiedlichen Orten detektiert werden können. Durch die Kompensation der akustischen Rückkopplung hängt die Gesamtdämpfung nicht mehr von den Interferenzeffekten am Ort des Referenzmikrophons ab.

Wie dargestellt, ist es auch bei Feedback-Systemen vorteilhaft, das Ausgangssignal des Kompensationsfilters über ein Modell der Fehlerstrecke mit negativem Vorzeichen auf den Eingang zurückzuführen. Dadurch gewinnt man eine Schätzung des reinen Störsignals $d(k)$ zur Ansteuerung von $G(z)$ und man erhält eine äquivalente Controller-Feedforward Anordnung.

Durch die Kombination dieser Struktur mit dem beschriebenen linear-prädiktiven Entzerrer, gelangt das Kompensationssignal über die resultierende Strecke

$$H_{\text{Ges}}(z) = H_{\text{Err}}(z) \cdot H_{\text{Entz}}(z)$$

an die akustische Summationsstelle 55 in Fig. 5. Weil nun die Bedingung

$$|H_{\text{Ges}}(e^{j\Omega})| \approx 1 \text{ für alle Frequenzen}$$

erfüllt ist, erscheinen sämtliche Komponenten des Störgeräuschs nahezu ungedämpft am Eingang des Adaptionalgorithmus, denn sowohl das Eingangs- als auch das Ausgangssignal von $G(z)$ werden zur Adaption der Koeffizienten mit der resultierenden Fehlerstrecke bewertet. Der mit gefilterten Signalen arbeitende Adaptionalgorithmus wird somit in die Lage versetzt, auch auf schnelle Änderungen in der spektralen Zusammensetzung des Störgeräuschs $d(k)$ zu reagieren. Dadurch wird durch diese Technik die Verarbeitung stark instationärer tonaler Störungen ermöglicht. Besonders wichtig ist dabei, daß durch die erzielte Minimalphasigkeit des prädiktiven Entzerrers keine wesentlichen, den Kompensationseffekt mindernde Streckenverzögerungen in $H_{\text{Ges}}(z)$ eingefügt werden, die dies bei der herkömmlichen inversen Modellierung der Fall ist.

Die Erfindung ist vorstehend an Hand eines einkanalen Systems zur aktiven Geräuschminderung beschrieben worden. Es sind jedoch mehrkanalige Varianten als zusätzliche vorteilhafte Weiterbildungen und Ausführungsformen der Erfindung möglich. In Fig. 6 wird in Gestalt eines zweikanaligen Systems ein Beispiel für eine mehrkanalige Variante beschrieben. Gegenüber der Darstellung von Fig. 1 handelt es sich um ein $2 \times 2 \times 3$ System, bei dem der Aufwand für die einzelnen Komponenten vervielfacht ist.

In Fig. 6 ist ein System dargestellt, welches mit zwei Referenzmikrophonen 631 und 632, zwei Lautsprechern 641 und 642 sowie drei Fehlermikrophonen 651, 652 und 653 ausgestattet ist. Die Referenzmikrophone 631 und 632 erzeugen ein jeweiliges Referenzsignal aus dem sie treffenden Störschall $x_1(k)$, bezeichnet mit dem Pfeil 621, bzw. $x_2(k)$, bezeichnet mit dem Pfeil 622. Das vom Referenzmikrophon 631 dedektierte Signal wird über einen Verstärker 661, einen Tiefpaß 671 und einen Analog-Digital-Wandler 681 einem Summationspunkt 6921 zugeführt. In analoger Weise wird das vom Referenzmikrophon 632 dedektierte Signal über einen Verstärker 662, einen Tiefpaß 672 und einen Analog-Digital-Wandler 682 einem Summationspunkt 6912 zugeführt.

Am Ort der Fehlermikrophone wirken verschiedene Größen ein. Dies sind die mit $d(k)$ bezeichneten, zu kompensierenden Störgeräusche und die von den beiden als Kompensationsquellen dienenden Lautsprechern abgestrahlten Signale, die mit den jeweils einwirkenden Übertragungsgrößen bzw. Fehlerstrecken, die allgemein mit H_e bezeichnet sind, gefiltert werden. So wirken am Ort des Fehlermikrophons 651 die mit dem Pfeil 6511 bezeichnete Störgröße $d_1(k)$, die Signale, welche über die zum Lautsprecher 641 bestehende Fehlerstrecke 4151 mit der Übertragungsfunktion H_{e11} und die Signale, welche über die zum Lautsprecher 642 bestehende Fehlerstrecke 4251 mit der Übertragungsfunktion H_e gefiltert werden, ein. Am Ort des Fehlermikrophons 652 wirken die mit dem Pfeil 6522 bezeichnete Störgröße $d_2(k)$, die Signale, welche über die zum Lautsprecher 641 bestehende Fehlerstrecke 4152 mit der Übertragungsfunktion H_{e12} und die Signale, welche über die zum Lautsprecher 642 bestehende Fehlerstrecke 4252 mit der Übertragungsfunktion H_{e22} gefiltert werden, ein. Schließlich wirken am Ort des Fehlermikrophons 653 die mit dem Pfeil 6533 bezeichnete Störgröße $d_3(k)$, die Signale, welche über die zum Lautsprecher 641 bestehende Fehlerstrecke 4153 mit der Übertragungsfunktion H_{e13} und die Signale, welche über die zum Lautsprecher 642 bestehende Fehlerstrecke 4253 mit der Übertragungsfunktion H_{e23} gefiltert werden, ein. Die von den Fehlermikrophonen 651, 652 und 653 jeweils festgestellten Fehlersignale $e_1(k)$, $e_2(k)$ und $e_3(k)$ stehen jeweils am Ausgang eines Analog-Digital-Wandlers 6181, 6182 bzw. 6183 an, nachdem sie unmittelbar davor jeweils einen Verstärker 6161, 6162 und 6163 in Reihe mit je einem Tiefpaß 6171, 6172 und 6173 durchlaufen haben.

An einem ersten Summationspunkt 6111 wird ein Kompensationssignal $y_1(k)$ durch Überlagerung der Ausgangssignale der beiden Regler 61011 und 61021 gebildet. Dieses Kompensationssignal wird nach Durchlaufen eines Digital-Analog-Wandlers 6131, eines Verstärkers 6151 und eines Tiefpasses 6141 vom Lautsprecher 641 zur Kompensation abgestrahlt. An einem zweiten Summationspunkt 6112 wird ein Kompensationssignal $y_2(k)$ durch Überlagerung der Ausgangssignale der beiden Regler 61012 und 61022 gebildet. Dieses Kompensationssignal wird nach Durchlaufen eines Digital-Analog-Wandlers 6132, eines Verstärkers 6152 und eines Tiefpasses 6142 vom Lautsprecher 642 zur Kompensation abgestrahlt.

Die vier Regler 61011, 61012, 61021 und 61022 entsprechen dem Regler 10 in Fig. 1. Diese Regler enthalten entsprechend den beiden Filtern 101 und 102 von Fig. 1, Filter, deren Anordnung und Filterfunktionen mit den Bezeichnungen A_{11} und B_{11} , A_{12} und B_{12} , A_{21} und B_{21} sowie A_{22} und B_{22} gekennzeichnet sind. Die mit LMS bezeichneten Einheiten A_{11} bis A_{22} sowie B_{11} bis B_{22} symbolisieren die Berechnung der zu adaptierenden Koeffizienten. Als Eingangsgrößen zu diesen Berechnungen dienen zum einen jeweils die von den Fehlermikrofonen 651, 652 und 653 ermittelten Fehlergrößen $e_1(k)$, $e_2(k)$ und $e_3(k)$. Die zum anderen zu berücksichtigenden Eingangsgrößen sind die Ausgangssignale der mit \uparrow gekennzeichneten FIR-Filter He_{11} , He_{12} , He_{13} bei den LMS-Einheiten A_{11} , B_{11} sowie A_{21} , B_{21} bei den Reglern 61011 und 61021 bzw. He_{21} , He_{22} , He_{23} bei den LMS-Einheiten A_{12} , B_{12} sowie A_{22} und B_{22} bei den Reglern 61012 und 61022. Diese mit \uparrow gekennzeichneten FIR-Filter sind Abschätzungen der jeweiligen, entsprechenden Übertragungsfunktionen He_{11} , He_{12} , He_{13} , und He_{21} , He_{22} , He_{23} , die bei der Systemidentifikation gewonnen werden. Sie sind mit den Bezugszeichen 4151, 4152, 4153 und 4251, 4252, 4253 versehen und bestehen zwischen den beiden Lautsprechern 641 und 642 einerseits und den Fehlermikrofonen 651, 652 und 653 andererseits.

Zur Kompensation der akustischen Rückkopplung werden erfindungsgemäß von den Referenzsignalen die entsprechenden, über das jeweilige Streckenmodell, das dem Streckenmodell 20 in Fig. 1 entspricht, geführten Signale subtrahiert. Damit wird eine Abschätzung $\hat{x}(k)$ vom ursprünglichen Referenzsignal $x(k)$ erhalten. Im Ausführungsbeispiel gemäß der Mehrkanalversion von Fig. 6 wird dazu an einem Summationspunkt 6921 vom Referenzsignal $x_1(k)$ das über das Streckenmodell \hat{H}_{r21} geführte Kompensationssignal $y_2(k)$ des zweiten Lautsprechers 642 subtrahiert. Vom so erhaltenen Ergebnis wird in einem anschließenden Summationspunkt 691 das über ein Streckenmodell \hat{H}_{r11} geführte Kompensationssignal $y_1(k)$ des ersten Lautsprechers 641 subtrahiert. Das so erhaltene Ergebnis ist die Abschätzung $\hat{x}_1(k)$ des um die akustische Rückkopplung bereinigten Referenzsignals $x_1(k)$. Dieses bereinigte Referenzsignal $\hat{x}_1(k)$ wird den Reglern 61011 und 61012 zugeführt. Weiterhin wird dazu an einem Summationspunkt 6912 vom Referenzsignal $x_2(k)$ das über das Streckenmodell \hat{H}_{r12} geführte Kompensationssignal $y_1(k)$ des ersten Lautsprechers 641 subtrahiert. Vom so erhaltenen Ergebnis wird in einem anschließenden Summationspunkt 692 das über ein Streckenmodell \hat{H}_{r22} geführte Kompensationssignal $y_2(k)$ des zweiten Lautsprechers 642 subtrahiert. Das so erhaltene Ergebnis ist die Abschätzung $\hat{x}_2(k)$ des um die akustische Rückkopplung bereinigten Referenzsignals $x_2(k)$. Dieses bereinigte Referenzsignal $\hat{x}_2(k)$ wird den Reglern 61021 und 61022 zugeführt.

Es erscheint klar, daß die im dargestellten Beispiel beschriebene mehrkanalige Version eine wesentliche Vermehrung des Aufwandes bedeutet, wobei jedoch durch die erfindungsgemäße Bereinigung der Referenzsignale durch die Gegenschaltung der jeweiligen Streckenmodelle der entsprechenden Fehlerstrecken auch hier eine robuste und wirkungsvolle Kompensierung der akustischen Rückkopplungen erzielt ist.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Kompensation der akustischen Rückkopplung bei einem System zur aktiven Geräuschminderung, wobei das System zur aktiven Geräuschminderung enthält:
Sensormittel (3) um Feststellen des Störgeräuschs (2), Mittel (4, 13, 14, 15) zur Erzeugung des Kompensationsgeräuschs,
Mittel (5) zur Feststellung des Ergebnisses der Überlagerung von Stör- und Kompensationsgeräusch,
Regelungsmittel (10, 210, 510, 610) mit adaptiven Filtermitteln zur Ansteuerung der Mittel (4, 13, 14, 15) zur Erzeugung des Kompensationsgeräuschs, wobei die Vorrichtung ein Mittel zur Kompensation der akustischen Rückkopplung zwischen der Kompensationsgeräuschquelle (4) und dem Sensormittel (3) zum Feststellen des Störgeräuschs enthält,
dadurch gekennzeichnet, daß die akustische Rückkopplung elektrisch kompensiert wird, wobei ein Streckenmodell (20, 220, 520, 620) bzw. ein Modell der Referenzstrecke gegenparallel zum Regler (10, 210, 510, 610) geschaltet ist, derart, daß der Ausgang des Streckenmodells mit negativem Vorzeichen auf den Eingang des Reglers geschaltet ist, und dadurch der Ausgang des Reglers nicht auf seinen Eingang einwirkt.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Streckenmodell (20, 220, 520, 620) im Rahmen einer Präambelphase vorab, d. h. vor Inbetriebnahme des Systems, gewonnen wird.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 bzw. 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Streckenmodell (20, 220, 520, 620) durch im Betrieb mitlaufende Systemidentifikation gewonnen bzw. laufend optimiert wird.
4. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Regler (10, 210, 510, 610) zwei adaptive FIR-Filter (101, 102, 201, 202) enthält, von denen das eine FIR-Filter (102, 202) rekursiv geschaltet ist, und beide Filter zusammen ein IIR-Filter (Infinite Impulse Response Filter), d. h. ein Filter mit unbegrenztem Ansprechen auf einen Impuls, bilden, wobei die FIR-Filter (Finite Impulse Response Filter) (101, 102, 201, 202) Filter mit begrenztem Ansprechen auf einen Impuls sind.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das IIR-Filter (10, 210) mit Hilfe einer gefilterten Variante des RLMS-Algorithmus (Recursive Least Mean Square Algorithmus) adaptiert wird.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Adaptationsprozeß durch Rückführung eines zusätzlichen FIR-Anteils unterstützt wird, wodurch die Anzahl der zu modellierenden Polstellen

verringert wird.

7. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das System in einer Steuerungs- bzw. Feedforward Struktur aufgebaut ist (Fig. 1 und 2).

8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß das System in einer Regelungs- bzw. Feedback Struktur aufgebaut ist. (Fig. 3 und 4).

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß ein Entzerrer (31) vorgesehen ist, welcher die vollständige Betragsentzerrung der Fehlerstrecke ($H_{\text{Ges}}(z)$) bewirkt.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Entzerrer (31) als Transversalfilter realisiert ist, dessen Entwurf vorzugsweise auf dem Prinzip der linearen Prädiktion basiert.

11. Vorrichtung nach einem der vorigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß sie auf ein mehrkanaliges System zur aktiven Geräuschminderung, insbesondere ein $2 \times 2 \times 3$ System mit zwei Referenzmikrophonen (631, 632), zwei Lautsprechern (641, 642) und drei Fehlermikrophonen (651, 652, 653), angewendet wird.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

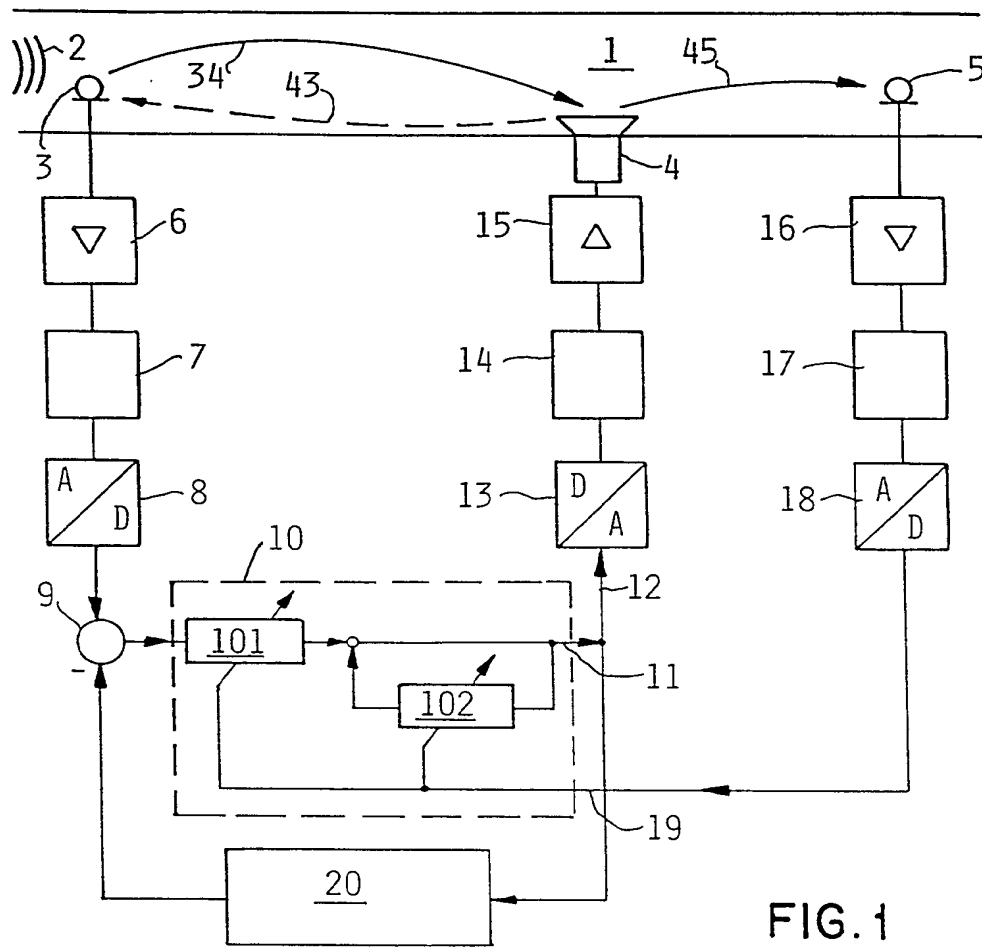


FIG. 1

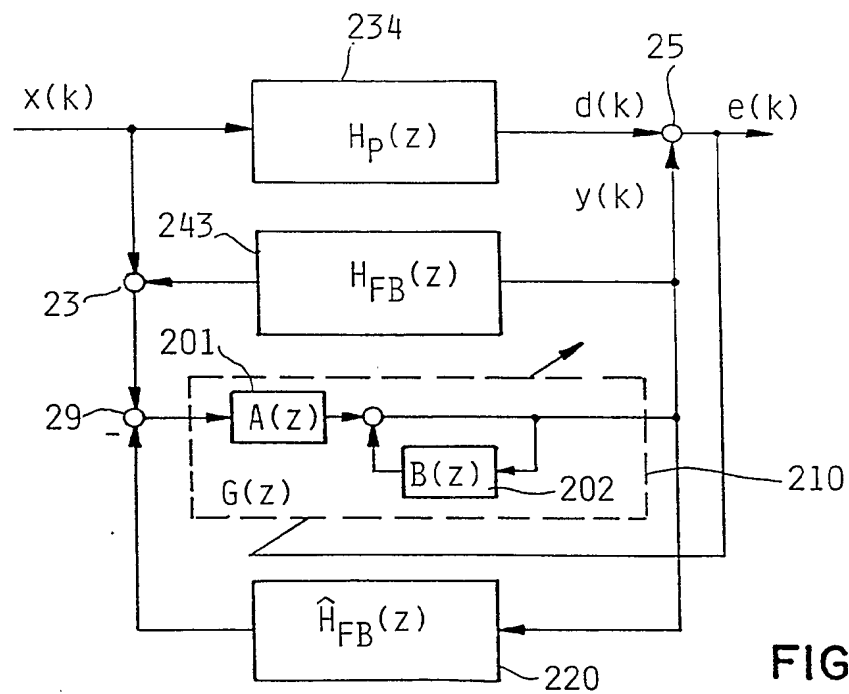


FIG. 2

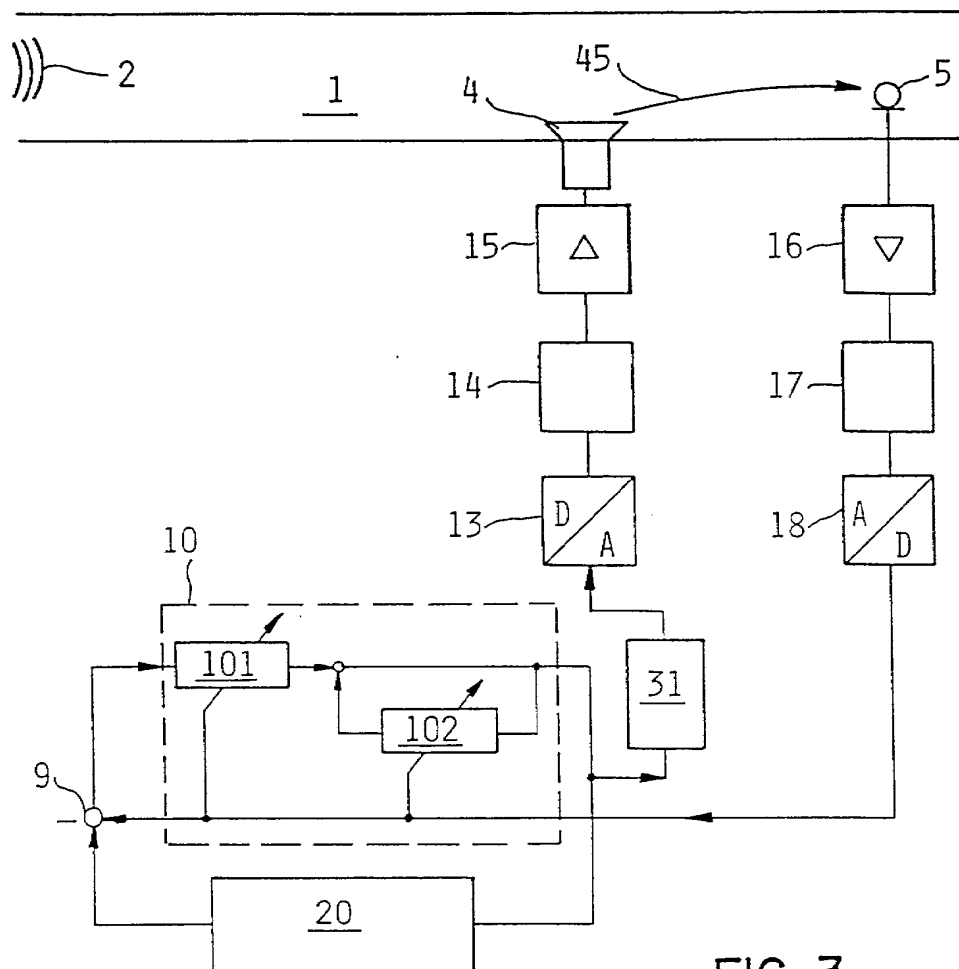


FIG. 3

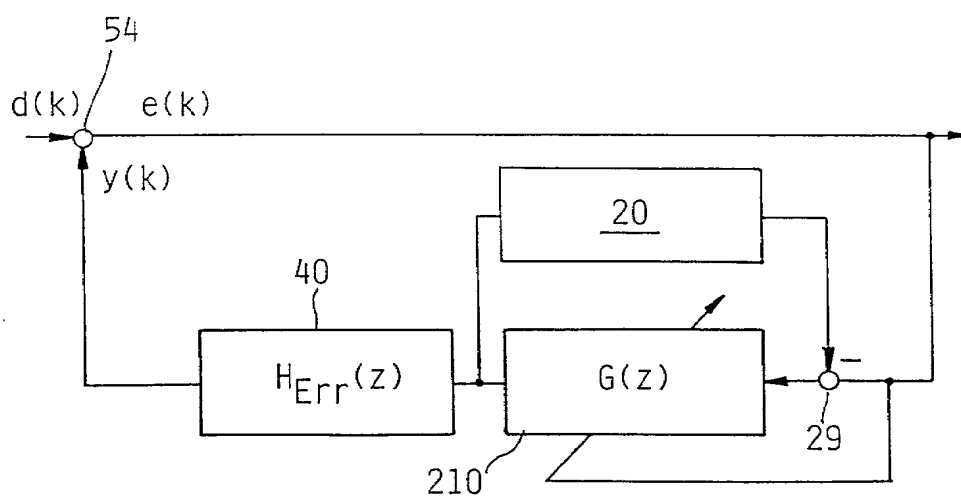


FIG. 4

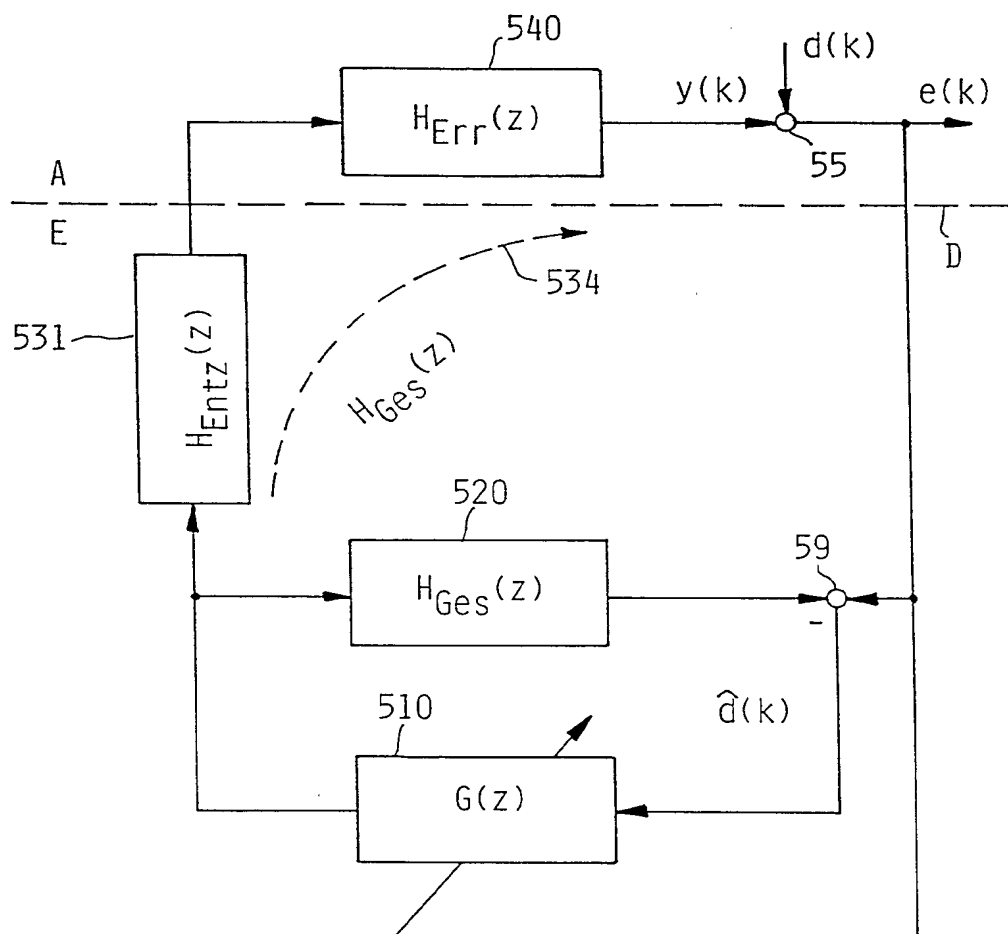


FIG.5

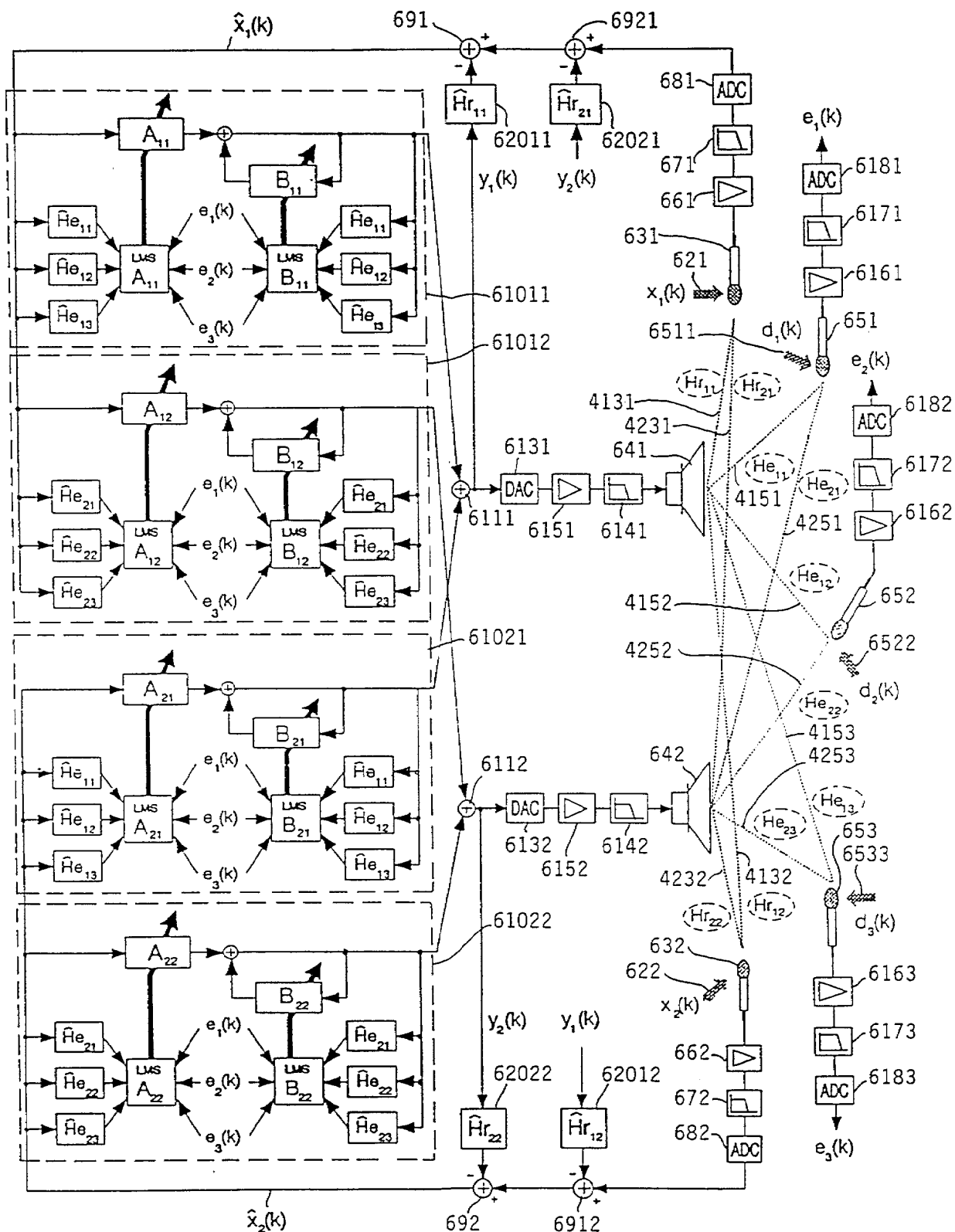


FIG. 6